

PEDRO HENRIQUE ABEM-ATHAR FRIAS

**MODELAGEM DE SUPERFÍCIES PARA ANÁLISE DE ESTABILIZAÇÃO DE  
RECALQUES NA PERSPECTIVA DA INTERAÇÃO SOLO ESTRUTURA**

Brasília  
2019

PEDRO HENRIQUE ABEM-ATHAR FRIAS

**MODELAGEM DE SUPERFÍCIES PARA ANÁLISE DE ESTABILIZAÇÃO DE  
RECALQUES NA PERSPECTIVA DA INTERAÇÃO SOLO ESTRUTURA**

Trabalho de Curso apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Civil do UniCEUB - Centro Universitário de Brasília.

Orientadora: Eng.<sup>a</sup> Gabriela de Athayde Duboc Bahia, Msc.

Brasília  
2019

PEDRO HENRIQUE ABEM-ATHAR FRIAS

**MODELAGEM DE SUPERFÍCIES PARA ANÁLISE DE ESTABILIZAÇÃO DE  
RECALQUES NA PERSPECTIVA DA INTERAÇÃO SOLO ESTRUTURA**

Trabalho de Curso apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Civil do UniCEUB - Centro Universitário de Brasília.

Orientadora: Eng.<sup>a</sup> Gabriela de Athayde Duboc Bahia, Msc.

Brasília, 07 de fevereiro de 2019

**Banca Examinadora**

---

**Eng.<sup>a</sup>. Gabriela de Athayde Duboc Bahia, Msc.**  
Orientadora

---

**Eng.<sup>a</sup>. Neusa Maria Bezerra Mota, Dsc.**  
Examinadora Interna

---

**Eng.<sup>o</sup>. Vinícius Resende Domingues, Msc.**  
Examinador Externo

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais pela paciência, valores, princípios, esforços e sacrifícios feitos para que eu tivesse oportunidades na vida diferentes das suas. Minha dívida com vocês só pode ser paga com amor, pois tudo que fizeram por mim foi impagável.

Aos meus amigos e amigas Adaut Lima, Alexandre Fonseca, Andressa Gomes, Bruna Dias, Caroline Yamamoto, Erick Araújo, Juliana Abrantes, Matheus Albuquerque, Márcio Dantas, Renison Reinaldo, Thiago Jullyan e Vitória Souza. Muito obrigado pelas infinitas horas de lazer, críticas construtivas, apoio intelectual e mental, e principalmente pela marca que vocês deixaram, principalmente nestes últimos anos.

Aos meus professores, obrigado por compartilhar suas experiências e conhecimento, em especial o professores João Marcos, Erika Castro e Sébastien Rondenaut que ministrou a disciplina de Cálculo Numérico no primeiro semestre de 2014. Nunca imaginei que os ensinamentos passados pelo senhor dentro e fora de sala de aula seriam tão úteis.

Ao Coordenador do Curso de Engenharia Civil Jocinez Nogueira Lima, obrigado pela sua acessibilidade, competência e atenção. Sempre que precisei o senhor estava pronto a me ajudar.

À minha Orientadora Gabriela Bahia meus agradecimentos a você vão muito além de sua paciência e apoio, não somente na confecção deste trabalho, mas também na minha inserção no mercado de trabalho.

À Dra. Neusa Mota e Dr. Edson Santos pelas oportunidades, conhecimentos e desafios. Não poderia escolher pessoas melhores para me orientar no meu início no mercado profissional.

## RESUMO

A tecnologia vem se tornando cada vez mais parte integrada da engenharia civil. Neste quesito, este trabalho faz uma análise da interação solo estrutura por meio de superfícies de deformação, onde todo o código necessário para esta análise foi feito para os fins deste trabalho. A metodologia consiste na aplicação do modelo clássico de dispersão dos dados junto com a interpolação espacial de uma malha triangular, a partir da qual foi feita uma comparação entre os monitoramentos de consecutivos monitoramentos realizados num edifício localizado em Ceilândia/DF. Por meio das variações verificadas entre os monitoramentos foi possível determinar os motivos da variação repentina de alguns pilares instrumentados após o término das etapas de construção da torre residencial. Durante a análise dos resultados as curvas de dispersão demonstraram-se inconclusivas devido a falta de dados prévios ao início do monitoramento, no entanto através das superfícies de deformações foi possível determinar que a torre atingiu o estado de adensamento secundário entre o sexto e sétimo monitoramento. Ao analisar os recalques relativos ainda foi possível observar a interação dos solo com a estrutura apontando qual pilar está apresentando a maior variação em função do recalque absoluto, demonstrando a eficiência do método em analisar a estabilidade de edifícios recalçando e monitoramento deste processo. Depois de concluído as análises verificou-se que os indicadores de desempenho mostraram-se satisfatórios.

## **ABSTRACT**

The technology has become an integrated part of civil engineering. On this topic, this paper makes an analysis on the interaction between the soil and structure using deformation surfaces, where the necessary code was made for the sole purpose of this task. The methodology consists of the classical approach using dispersion curves, alongside with a spatial interpolation of a triangular network, those will be used to compare the data descendant leveling of a residential building in Ceilândia/DF. The variations shown made possible to determine the reason why some pillars changed its level so sudden after the construction phase ended. In amidst of the analysis the dispersion curves were deemed inconclusive, yet it was possible to verify traces of stabilization using the surfaces after the seventh data collection. It was possible to observe the interaction between the soil and the structure using the relative shear, showing the effectiveness of the method for analysing the shear building stability and monitoring the structure-soil interaction process. After the analysis were done the foundations KPIs shown a satisfactory result.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	9
1.1. OBJETIVOS.....	10
1.1.1. Geral.....	10
1.1.2. Específicos.....	10
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	11
2.1 Recalque.....	11
2.2. Tipos de Recalque.....	12
2.3. Monitoramento de Recalque.....	13
2.4. Metodologia para Análise de Recalque em Obras Instrumentadas .....	16
<b>3. ESTUDO DE CASO</b> .....	18
3.1. Caracterização da Obra.....	18
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	21
4.1. Monitoramento de Recalque.....	21
4.2. Modelagem de superfícies.....	22
4.3. Desempenho das fundações.....	29
<b>5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS</b> .....	30
5.1. Dados de Monitoramento.....	30
5.2. Interação Solo estrutura.....	33
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	39
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	41
<b>ANEXOS</b> .....	43

## LISTA DE IMAGENS

<b>Figura 1</b> - Recalque Diferencial.....	12
<b>Figura 2</b> - Recalques diferenciais, rotação e deformação angular.....	15
<b>Figura 3.</b> - Limites para distorção angular.....	16
<b>Figura 4.</b> - Curva norma de dispersão.....	18
<b>Figura 5.</b> - Referência regional onde a edificação foi construída.....	19
<b>Figura 6</b> - Planta com a locação do pilares instrumentados da torre A 20.....	20
<b>Figura 7</b> - Planta com a locação do pilares instrumentados da torre C 21.....	21
<b>Figura 8</b> - Detalhamento do pino de monitoramento 22.....	22
<b>Figura 9</b> - Fluxograma geral do procedimento realizado pelo script. 24.....	24
<b>Figura 10</b> - Dispersão dos pontos de coordenadas x, y e z, no plano 2D .....	25
<b>Figura 11.</b> - Malha triangular de Delaunay.....	26
<b>Figura 12.</b> - Malha triangular composta pontuada regularmente.....	27
<b>Figura 13</b> - Representação tridimensional de um terreno com curvas de nível	28
<b>Figura 14.</b> - Mapa de calor.....	29
<b>Figura 15</b> - Dispersão dos representado a interação solo estrutura da torre A	33
<b>Figura 16</b> - Dispersão dos representado a interação solo estrutura da torre C	33
<b>Figura 17</b> - Porcentagem de conclusão da torre A .....	34
<b>Figura 18</b> - Porcentagem de conclusão da torre C.....	34
<b>Figura 19.</b> - Mapas de calor da torre A.....	35
<b>Figura 20</b> - Recalque no grupo de Pilares P114,108,109,115 e 124.....	36
<b>Figura 21</b> - P103 e P106.....	36
<b>Figura 22</b> - Mapas de calor da torre C.....	37
<b>Figura 23</b> - Velocidade de recalque da torres A e C.....	38

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Dados de recalque dos monitoramentos realizados na torre A.....	30
<b>Tabela 2</b> - Dados de recalque dos monitoramentos realizados na torre C...	31

## 1. INTRODUÇÃO

O recalque é um fenômeno comum a todas as estruturas apoiadas no solo, podendo ocorrer, principalmente, devido ao carregamento imposto ao maciço. Este carregamento aplicado ao solo, ao longo do tempo, provoca deformações que, por sua vez, modificam a distribuição de carregamentos nos pilares e vigas, podendo fazer com que estes fiquem fora dos padrões definidos em projetos. Dessa forma, a referida modificação de carregamentos na estrutura pode corroborar com o aparecimento de avarias que vão desde um desconforto visual até danos severos que colocam em risco a integridade da estrutura.

Um maciço de solo é uma estrutura natural formada por múltiplas camadas de materiais distintos, cada um com suas próprias características e comportamentos. Além disto, estas camadas não são homogêneas quanto ao estado da matéria que as compõem: uma amostra pode conter material sólido, líquido e gasoso. Logo, o solo é um sistema extremamente complexo e diferentemente de outros sistemas nem sempre é possível alterar suas características naturais por outras artificiais, com maior grau de previsibilidade, dado o impacto financeiro que seria aplicado nas obras.

Tal constatação implica que a tratativa mais comum é: adequação das estruturas em relação ao maciço que as sustenta. Desta forma, é necessário que nas etapas de projeto se tenha à disposição laudos técnicos de investigação do substrato de solo para que o projeto estrutural e de fundações sejam concebidos de maneira integrada, como proposto por Osvaldo *apud* Meyerhof (1953), e posterior a esta fase monitoramentos constantes iniciados já na fase construtiva, que irão se prolongar por toda a vida útil da edificação.

A grande importância de um monitoramento nos primeiros meses é a capacidade de mitigar falhas na edificação, pois o problema pode estar tanto na estrutura quanto na fundação ou ainda na execução.

Para Russo (2005) ainda há uma falha nesta questão no cenário nacional e era de se esperar uma maior visualização do tema devido aos estímulos proporcionados pela Norma Brasileira de Projetos de Fundações (ABNT - 1996), atualizada em 2010.

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1. Geral**

Desenvolver *scripts* para que auxiliem na visualização das informações produzidas por dados de recalque levantados *in loco* e, por meio destes, realizar uma análise qualitativa quanto à sua estabilização.

### **1.1.2. Específicos**

- Apresentar a metodologia de desenvolvimento das ferramentas para observação da interação solo estrutura através de que esta pode ser observada a partir do recalques relativos;
- Analisar o desempenho das fundações de duas das torres de um complexo de edifícios localizados no Distrito Federal, com base nos dados coletados por meio do monitoramento de recalques e verificando se os resultados estão dentro dos padrões normativos.

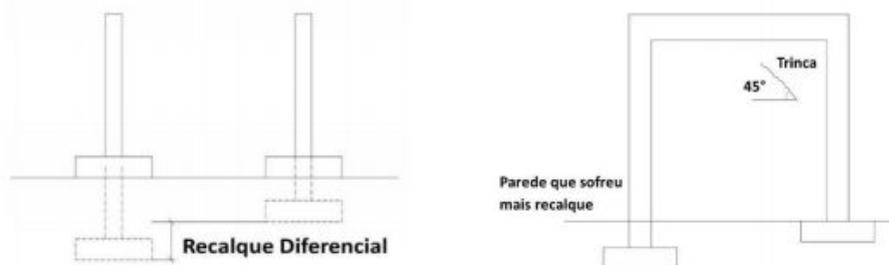
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Recalque

Recalque é um fenômeno comum a todas as edificações, seja qual for sua magnitude. As anomalias manifestam-se nos casos que os valores admissíveis são excedidos devido a erros de projetos, execução ou falhas derivadas de investigações geotécnicas.

Segundo a NBR 6122/10 recalque é o movimento vertical descendente de um elemento estrutural. Quando o movimento for ascendente, denomina-se levantamento. Convenciona-se representar o recalque com o sinal positivo. Para Alonso (1991, 14p) *“O recalque absoluto é definido pelo deslocamento vertical de um elemento de fundação. A diferença entre os recalques absolutos de dois quaisquer elementos da fundação é o recalque diferencial”* .

**Figura 1** - Recalque Diferencial com angulação típica da trinca atribuída a este fenômeno.



**Fonte** - Rebello (2008)

Rebello (2011) caracteriza o recalque como a deformação sofrida pelo solo por meio do carregamento que lhe é imposto. Esta deformação faz com que as fundações se movimentem, e a depender da intensidade é possível que comprometa a estrutura de um edifício. Para o mesmo, as deformações podem ocorrer de três formas: deformação elástica do solo, escoamento lateral e deformação por adensamento.

### **2.1.1. Tipos de Recalque**

Recalque elástico é o fenômeno verificado imediatamente após a aplicação de cargas. Sua ocorrência e intensidade estão associadas ao tipo de solo, ocorrendo com maior intensidade em solos não coesivos e menor em solos argilosos. Para determinar a magnitude de deformação é necessário ter conhecimento do módulo de elasticidade do solo.

A deformação por escoamento acontece com maior predominância em solos não coesivos. A parcela do solo que está submetida a um carregamento mais intenso tende a migrar para locais onde as solicitações são menores, causando um fluxo de material a partir do epicentro da região de carregamento.

As deformações por adensamentos são oriundas da diminuição do volume aparente dos maciços, causada pela expulsão de água dos vazios devido à pressão exercida pelas fundações. Este divide-se em primários e secundários.

Melo (2003) afirma que o adensamento primário ocorre devido à drenagem do solo a partir de uma tensão aplicada, esta resposta é imediata ao esforço exercido no solo. Conforme Simons e Menzies (1977), os recalques instantâneos são resultantes das deformações da massa do solo, a volume constante no momento que são carregados, já os recalques devido ao adensamento são resultante da dissipação da poropressão de água. Por fim o adensamento secundário ocorre devido às tensões efetivas.

A ocorrência de recalques também pode estar associada à necessidade do rebaixamento do nível do lençol freático. Este processo produz uma diminuição na pressão neutra causada pela água, se esta pressão diminuir ao ponto de tornar-se inferior à tensão exercida pelo maciço o solo irá adensar o solo naturalmente, mesmo sem aumento na carga aplicada nas fundações. Rebello (2011) explica que os efeitos variam conforme os modelos de fundações adotadas: no caso das sapatas, como a tensão é distribuída através da base verifica-se um rebaixamento

na cota, já nas estacas, por trabalharem predominantemente por atrito lateral é possível que estas venham a romper devido ao incremento na carga de trabalho.

Ainda é possível que a estrutura esteja sobre um maciço de solo colapsível, nestes casos é preciso observar tanto a presença de água como o incremento dos carregamentos aplicados na fase de construção, pois ambos os casos podem provocar o rompimento das ligações entre as partículas causando um aumento repentino no recalque.

### **2.1.2. Monitoramento de Recalque**

O monitoramento de recalque é um procedimento executado repetidas vezes com espaçamento entre as medições a depender do caso. Tal ensaio fornece dados de quanto uma estrutura recalcou desde o seu nivelamento. O monitoramento fornece informações a cerca do desempenho das fundação, monitorados por intermédio da magnitude dos recalques, presença de recalque diferencial, velocidade de recalque e recalque diferencial.

Milititsky et al. (2005) recomendam que para uma análise mais rigorosa acerca dos deslocamentos dos elementos de fundações verifique-se junto com o recalque absoluto a velocidade de recalque, dado que dois elementos com variações distintas - mesmo que ao estabilizar estejam na mesma cota - produzem ao longo do processo recalques diferenciais. Os autores também apresentam valores de referência que podem ser utilizados para determinar a eficácia do elementos de fundação:

- Prédios com mais de cinco anos, velocidade menor que 10  $\mu\text{m}/\text{dia}$ ;
- Entre um e cinco anos, entre 10 e 20  $\mu\text{m}/\text{dia}$ ;
- Prédios em fundações diretas em fase construtiva, até 200  $\mu\text{m}/\text{dia}$
- Prédio com fundações profundas em fase construtiva, máximo 80  $\mu\text{m}/\text{dia}$ .

O recalque diferencial ocorre quando não existem uniformidades no deslocamento das fundações o que pode provocar uma redistribuição de esforços nos elementos estruturais, corroborando para o aparecimento de danos na

superestrutura. Ocorre, em geral, uma transferência de carga dos apoios que tendem a recalcar mais para os que tendem a recalcar menos. Diversos trabalhos relatam casos de esmagamento de pilares periféricos devido à sobrecarga proveniente de redistribuição da carga em edificações.

A distorção angular (Figura 2), ou recalque distorcional, é definida como o recalque diferencial sobre as distâncias entre os elementos que o compõe.

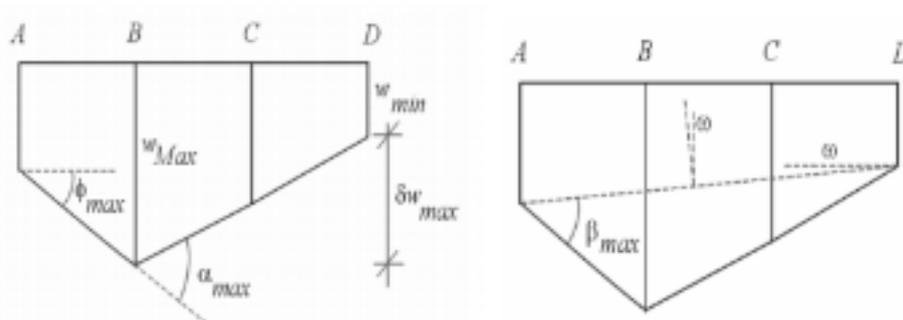
$$\delta = |R_i - R_{(i+n)}| / L \quad \text{Eq. 01}$$

$\delta$  = distorção angular;

R = Recalque de um elemento de qualquer de fundação;

L = Distância.

**Figura 2** - recalques absolutos e diferenciais, rotação e deformação angular. 15

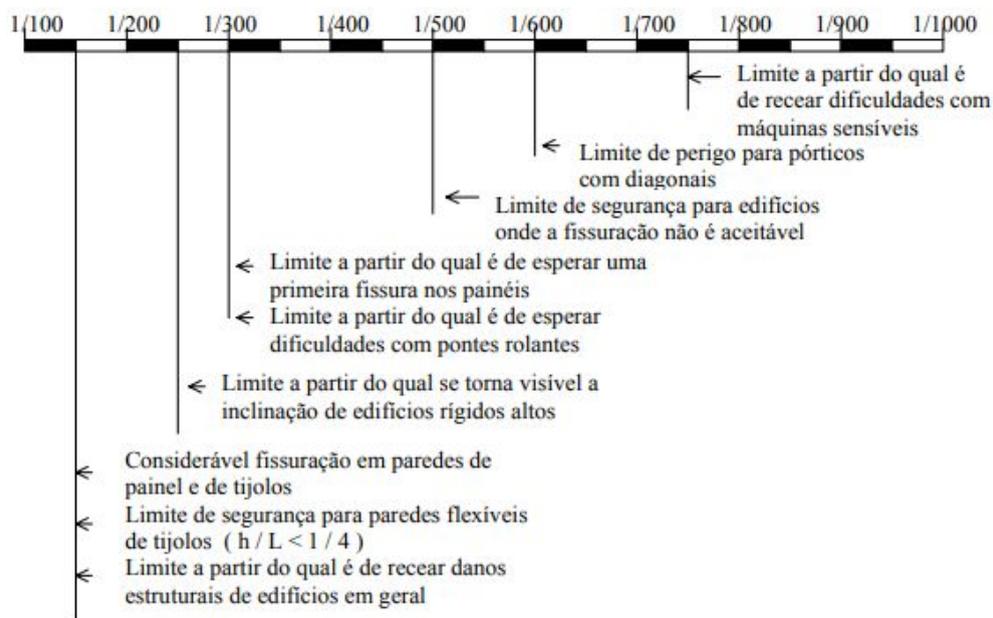


**Fonte** - Barros (2005)

Velloso e Lopes (1997) ressaltam que a previsão de recalques é uma das técnicas mais complexas da Geotecnia e os resultados obtidos por cálculos, mesmo que sofisticados, devam ser assumidos como estimativas, evidenciando a necessidade de realizar a medição para obter resultados realistas.

Por esta razão é de extrema importância que seja feito o monitoramento periódico, principalmente nos estágios iniciais da obra, para que o engenheiro civil responsável, em posse dos dados coletados, seja capaz de avaliar se os recalques estão dentro dos níveis admissíveis ou se a estrutura apresenta riscos. A Figura 3 associa alguns problemas que podem ser verificados a depender do recalque distorcional verificado nas estruturas.

**Figura 3.** - Limites para distorção angular.



**Fonte:** Velloso e Lopes 2011.

É importante ressaltar que estes parâmetros listados nos parágrafos acima são dados estatísticos e devem ser considerados somente para caso habituais. A capacidade real de suportar uma solicitação extra imposta pelo recalque é oriunda do projeto, estes valores servem apenas para indicar as faixa onde os problemas começam a aparecer e não faz referência a quais são os tipo de dano causados (JARBAS, 2008).

Como mencionado anteriormente, as fissuras podem ser um indicativo de recalque diferencial e estas podem evoluir ao ponto de causar danos que podem ir além da estética de uma edificação. Os danos são classificados em arquitetônico, estruturais e funcionais. Os danos arquitetônicos são aqueles que causam nenhum dano à estrutura ou uso de uma edificação, causam apenas um desconforto visual, tal como alguns tipos de fissuras.

Os danos funcionais já tem um efeito mais perceptível: causam um desalinhamento de portas e janelas, desaprumo do eixo vertical (efeito notado mais facilmente em edifícios), podendo afetar o equilíbrio dos usuários. Os eventos adversos relacionados com o rebaixamento de uma estrutura manifestam-se majoritariamente quando este não é uniforme, porém um recalque absoluto acentuado pode danificar sistemas como o de água e esgoto, logo todas as formas de recalque apresentadas devem ser contidas em níveis aceitáveis.

A distorção angular transmite esforços de flexão para os elementos estruturais básicos: vigas, lajes e/ou pilares, além desta carga adicional, o surgimento de aberturas causam uma concentração de esforços na armadura metálica, que a longo prazo vai se deteriorando devido à sua exposição. Em casos críticos, este tipo de dano pode levar ao desabamento.

Diversos trabalhos destacam a importância dos estudos preliminares, como por exemplo o SPT, de forma a verificar o tipo e a disposição dos horizontes estratigráficos do solo, para que o projeto seja concebido de maneira a produzir uma distribuição de cargas eficiente, favorecendo a tendência natural do recalque de atingir valores cada vez mais próximos do que possa ser considerado nulo, e assim minimizados os riscos.

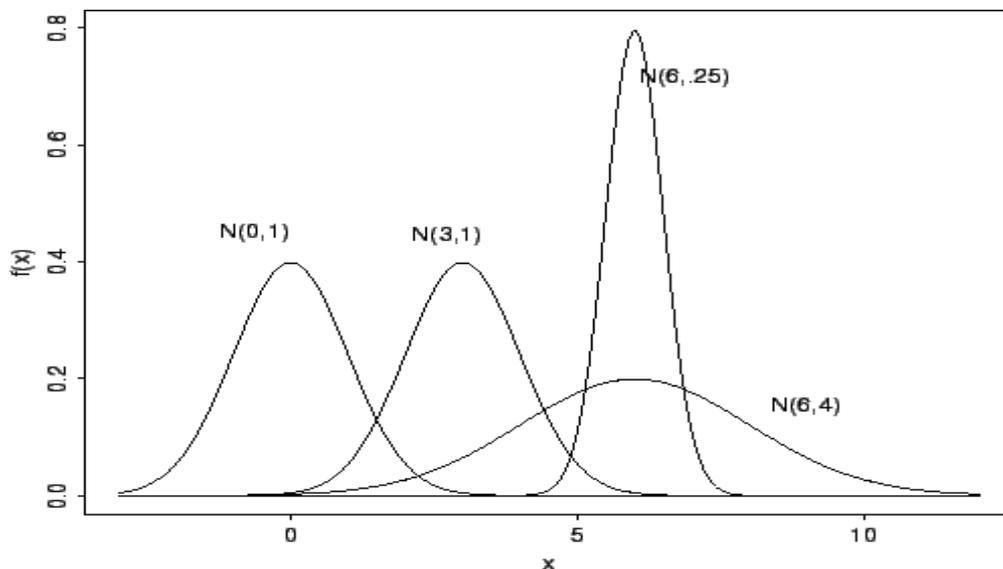
### **2.1.3. Metodologia para análise de recalque em obras instrumentadas**

Para Gusmão (1990) é possível analisar o desempenho de uma edificação de duas maneiras: comportamento tensão-deformação do solo de fundação, e um modelo que representa a interação solo-estrutura. Ainda segundo o autor a interação solo-estrutura influencia o comportamento dos recalques provocando uma

variação entre os recalques previstos e os recalque absolutos reais, de modo inversamente proporcional ao carregamento aplicado: os pilares mais carregados tendem a recalcar menos, e os menos carregados a recalcar mais que o previsto, embora o recalque absoluto médio seja praticamente o mesmo.

Tal afirmação indica que a redistribuição de cargas causadas pelo recalque diferencial promove uma regularização da deformada em torno da média ao longo do tempo. Esta regularização possibilita uma análise por meio da dispersão das curvas de frequências (Figura 4) produzidas a partir dos dados coletados pelo monitoramento de recalque.

**Figura 4 - Curva normal de dispersão.**



**Fonte -** <http://leg.ufpr.br/~silvia/CE701/node36.html>

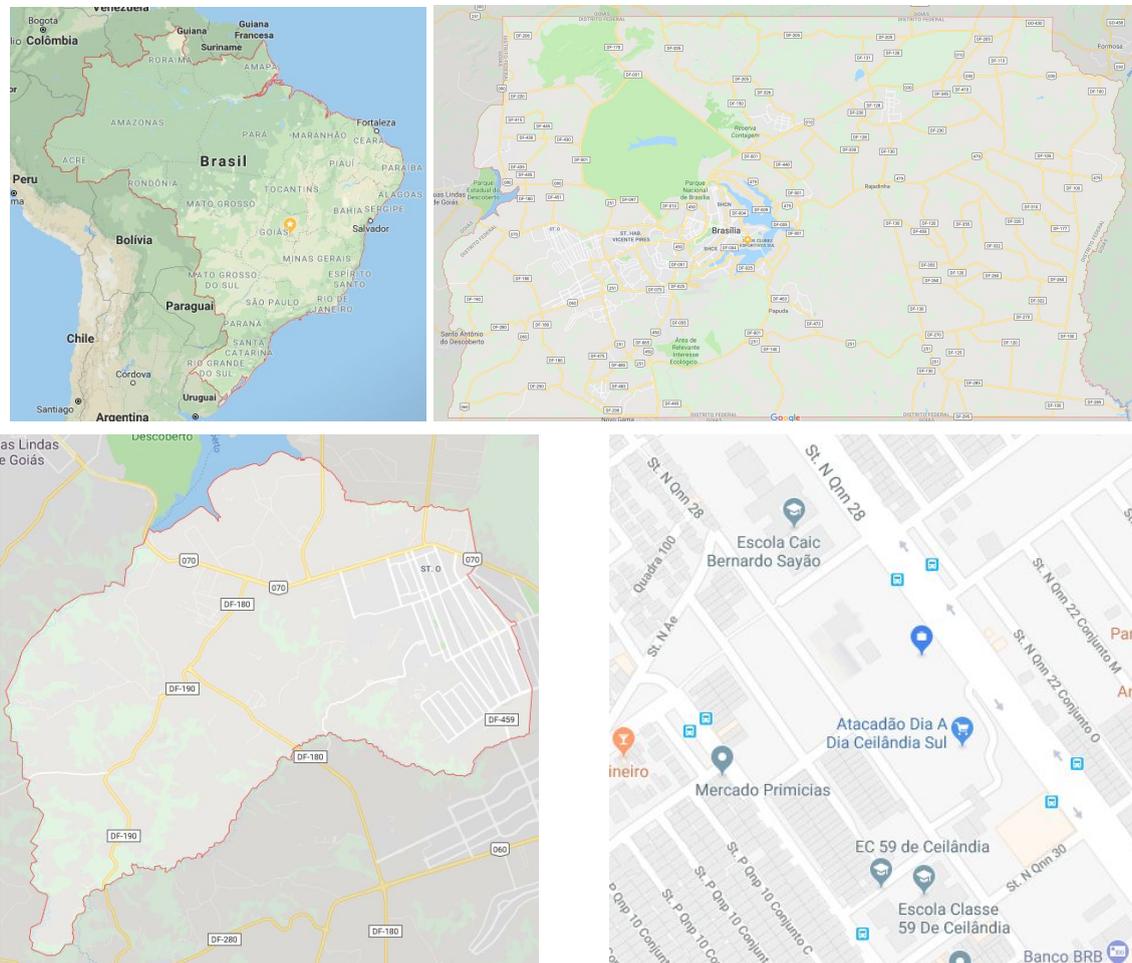
É preciso ressaltar que a simples comparação entre as dispersões correspondentes aos recalques pode resultar em erros de interpretação, pois as curvas de frequência desconsideram a ordem de grandeza dos recalques absolutos, em virtude disto Gusmão (1990) recomenda que se use o coeficiente de variação das curvas, que é a relação entre o desvio padrão e o valor médio.

### 3. ESTUDO DE CASO

#### 3.1. Caracterização da Obra

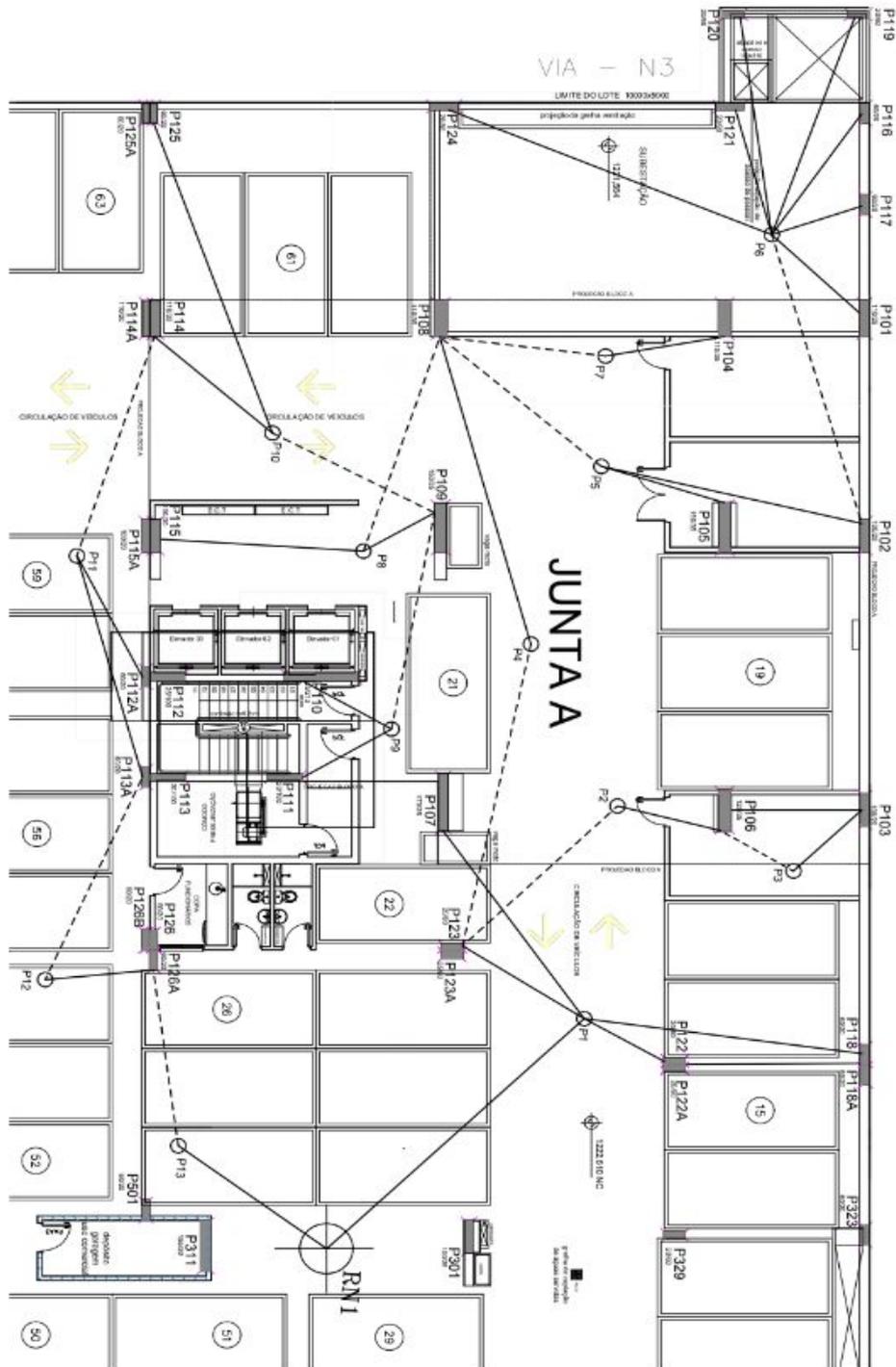
Os dados pertencem a um complexo formado por três torres, A, B e C, das quais apenas a torre A e C foram feitos monitoramentos (no período deste trabalho). A torre A, usada para fins comerciais, possui quinze pavimentos e a C, residencial, dezesseis. A posição geográfica pode ser vista na Figura 5, e o layout dos pilares nas Figuras 6 e 7.

**Figura 5. - Localização das torres**



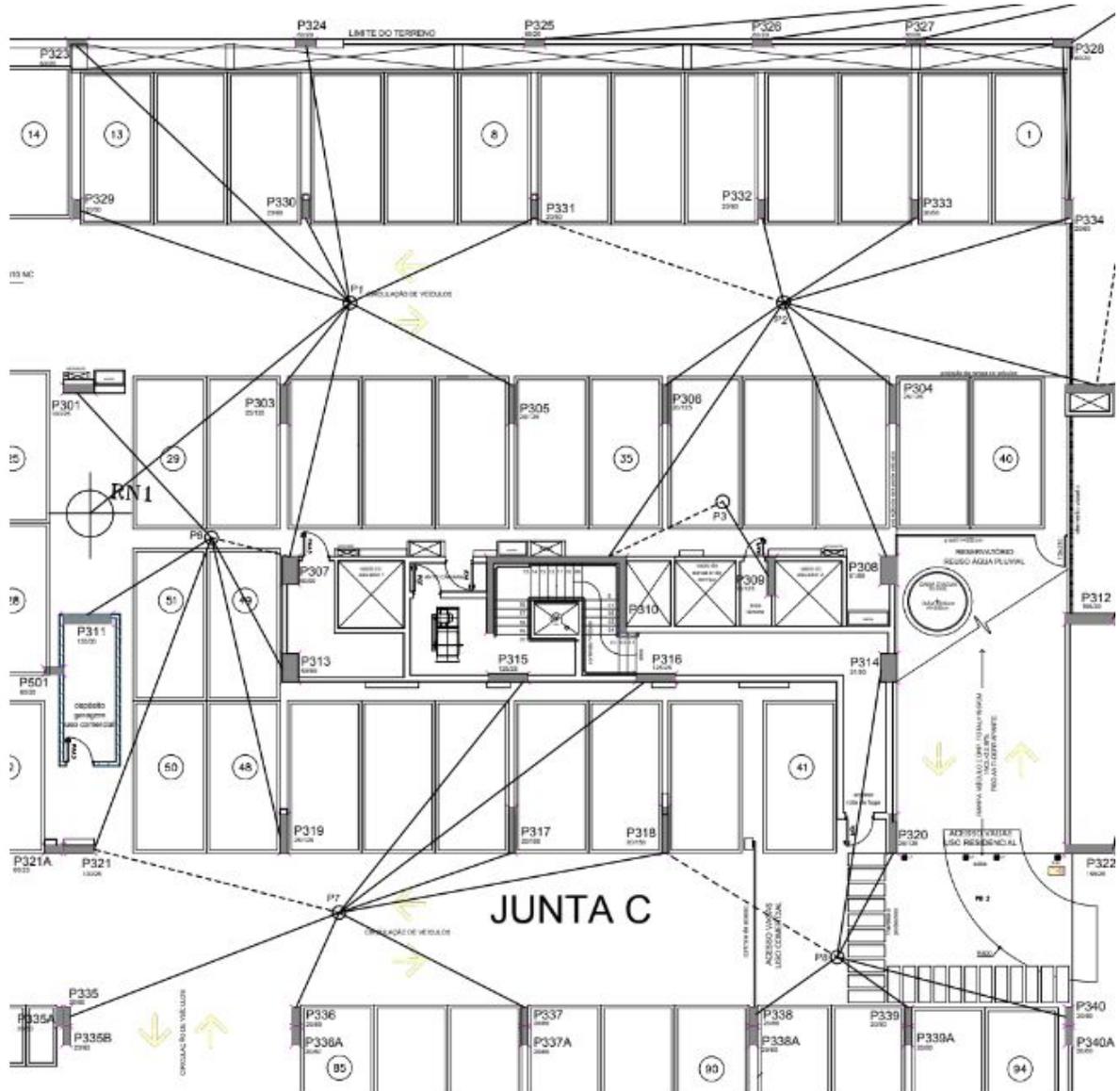
Fonte - Google Earth

**Figura 6 - Planta com a locação do pilares instrumentados da torre A**



**Fonte - Documentação fornecida pelo empreendimento para planejamento dos pilares a serem instrumentados**

**Figura 7 - Planta com a locação do pilares instrumentados da torre C**



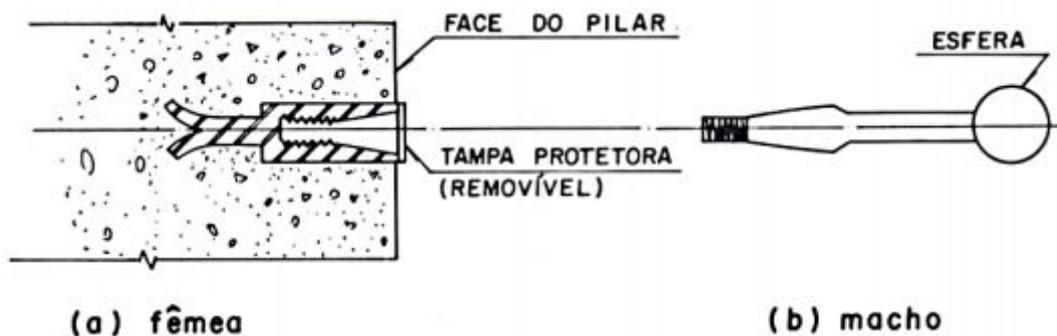
**Fonte - Documentação fornecida pelo empreendimento para planejamento dos pilares a serem instrumentados**

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Monitoramento de Recalque

O monitoramento foi realizado utilizando pilares instrumentados com pinos, Figura 8, que servem de apoio para uma mira graduada. Utilizando níveis ópticos para a leitura da mira foi possível determinar a cota de cada um dos pilares em relação ao *benchmark*. Para a realização do *benchmark* ou referencial de nível profundo foi instalada uma tubulação de aço galvanizado dentro de um furo de sondagem que se estende até o solo impenetrável, este tubo foi solidarizado ao solo por meio de uma calda de cimento. Desta maneira o referencial mantém-se estático ao longo das medições.

*Figura 8 - Detalhamento do pino de monitoramento*



*Fonte - Detalhe do pino de leitura de recalque (ALONSO, 1991)*

Os dados produzidos foram armazenados em tabelas nas quais foi possível iterar e determinar os indicadores de: recalques parciais, absolutos, deformação da superfície, interação solo-estrutura e o distorcional.

O monitoramento foi feito entre os dias 05/11/2015 e 25/05/2017 sendo que a primeira leitura serviu de referência para as demais. Devido ao fato de que o monitoramento foi realizado ainda no período de construção alguns pinos foram danificados, sendo assim em algumas medições não foi possível realizar o levantamento da cota de determinados pilares, nestes casos foi preciso nivelar novamente os pilares e usar como ponto de partida o último resultado válido.

## 4.2. Modelagem de superfícies

Para escrever o código necessário para a análise, foi utilizado GNU Octave (sistema operacional tipo Unix cujo objetivo desde sua concepção é oferecer um sistema operacional completo e totalmente composto por *software* livre).

Octave é uma linguagem computacional, desenvolvida para computação matemática. Possui uma interface em linha de comando para a solução de problemas numéricos, lineares e não-lineares, também é usada em experimentos numéricos. Esta linguagem faz parte do projeto GNU, é um *software* livre sob os termos da licença GPL (*General Public License*). O script recebe como entrada de dados três argumentos:

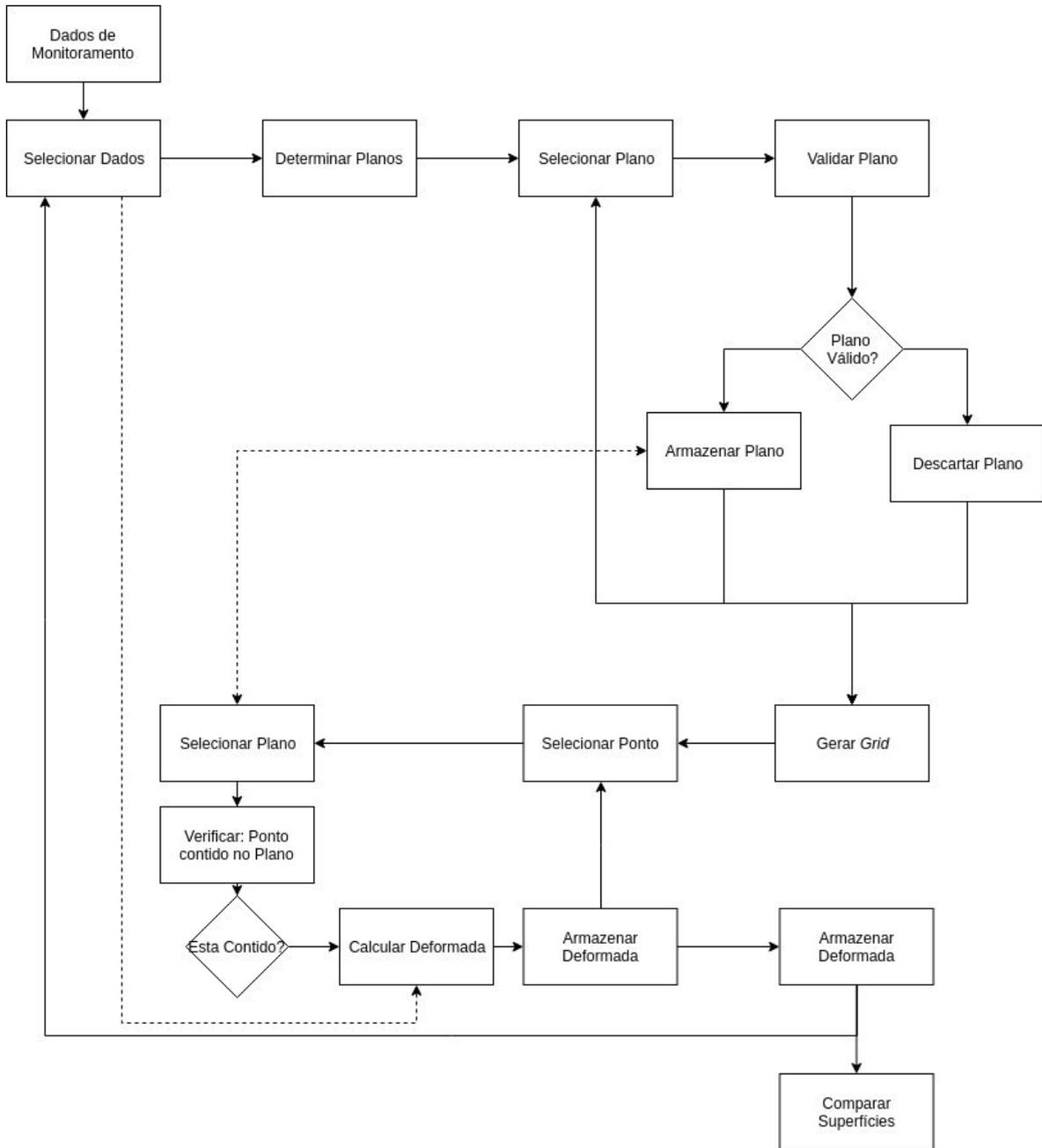
- Primeiro Argumento: Matriz contendo os pilares com suas nomenclaturas e posições no espaço;
- Segundo e terceiro argumento: Matriz com os dados coletados pelo monitoramento de recalque.

A partir destes argumentos serão produzidas as superfícies de recalques absolutos e relativos usando as curvas de nível para determinar as cotas absolutas e mapas de calor, respectivamente. O método está subdividido em três etapas:

- Definição de uma malha triangular que representa a superfície;
- Transformação desta malha triangular numa superfície contínua livre de arestas;
- Comparação das superfícies produzida por dois conjuntos de dados distintos.

Na Figura 9 é possível ver o diagrama resumindo o procedimento executado pelo script que irá gerar as superfícies de duas medições e compará-las a fim de monitorar visualmente a interação solo-estrutura.

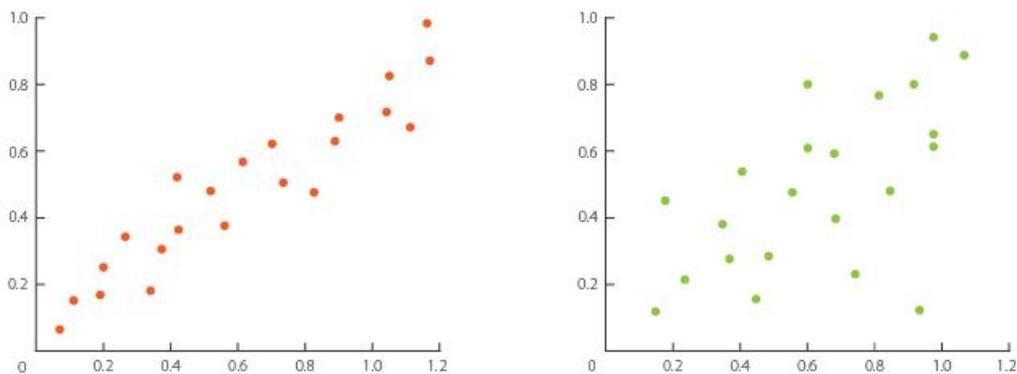
**Figura 9 - Fluxograma geral do procedimento realizado pelo script.**



**Fonte - Draw.io**

Formalmente, um terreno é um gráfico da função que atribui uma altura para cada ponto  $P(x,y)$ , Figura 10, no domínio,  $A$ , do terreno. A representação (virtual) do terreno (real) em forma de estrutura de dados, segundo os valores da função  $f$ , é chamada de malha. A malha passar a ser chamada de triangular após unir três pontos pontos distintos.

**Figura 10** - Dispersão dos pontos de coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$ , no plano 2D

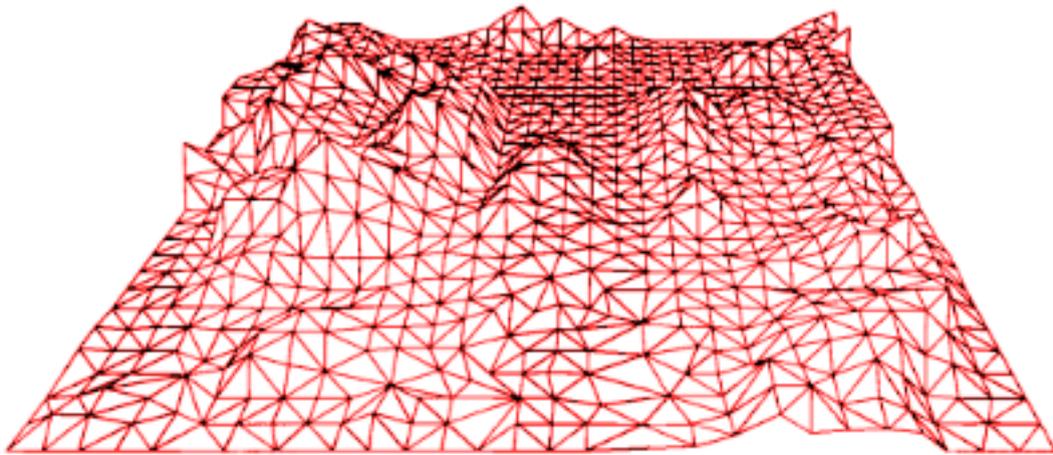


**Fonte** - <https://datavizcatalogue.com/methods/scatterplot.html>

Este método foi escolhido para determinar a região formada pelos dados coletados que irá abrigar os pontos gerados computacionalmente, pois consiste em estabelecer uma malha triangular de modo a favorecer os triângulos com as estruturas equiláteras, ou o mais próximo disso possível, sendo assim a malha será preenchida por entidades com uma melhor relação perímetro x área, Figura 11.

Neste método, três pontos distintos são escolhido e uma equação de circunferência é definida de modo a passar por estes três pontos. O critério de validação utilizado é a inexistência de demais pontos circunscritos.

**Figura 11.** - Malha triangular de Delaunay.



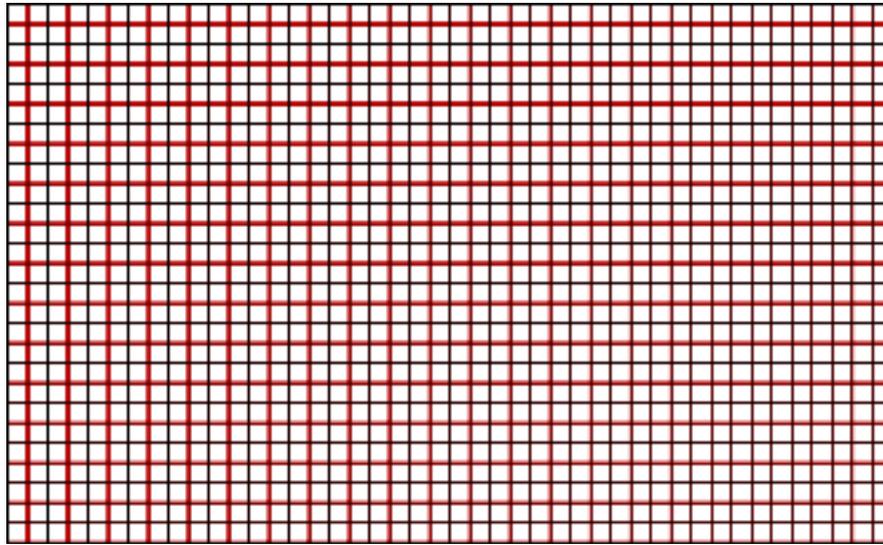
**Fonte** - <https://fei.edu.br/>

Apesar de se tratar de uma superfície tridimensional, esta análise pode ser feita considerando somente a projeção num plano bidimensional sem prejuízo no produto final. O critério de validação destes planos é a ausência de pontos dentro de uma circunferência formada por qualquer triângulo.

É importante ressaltar que este método não foi utilizado para determinar a superfície. O objetivo de sua implementação foi fornecer uma matriz  $D_{n,3}$ , onde os elementos de uma linha são os endereços dos pontos que forma um plano válido. Sendo assim, se  $R$  é uma matriz onde nas primeiras colunas estão as posições dos pilares instrumentados e na terceira coluna está o recalque verificado em uma determinada medição e os elementos  $R_i$ ,  $R_j$  e  $R_k$  satisfazem a condição de existência:  $D_n = [R_i \ R_j \ R_k]$ .

O método escolhido para transformar a malha triangular numa superfície foi o Inverso da Inverso da Distância Ponderada, desenvolvido no *Harvard Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis* em 1965. Primeiramente, é preciso produzir uma malha regular para preencher toda a superfície, conforme pode ser observado na Figura 12.

**Figura 12.** - disposição regular dos pontos



**Fonte** - <https://forums.getpaint.net/>

Feito isto, para cada um destes pontos será determinado um valor em  $z$ , dado pela Equação 2. Esta equação irá comparar a posição do ponto gerado computacionalmente com os pontos que formam os vértices do triângulo no qual o ponto está contido e irá estimar suas coordenada  $P = (x, y, z)$ , onde  $z = R^v_{ij}(x, y)$ .

$$R^v_{ij}(x, y) = \left( \sum_{i=1}^n p_i(x, x_i, y, y_i) R^r_i \right) / \left( \sum_{i=1}^n p_i(x, x_i, y, y_i) \right) \quad \text{Eq. 02}$$

$R^r_i$  = Recalque real verificado *in loco* ;

$R^v_{ij}$  = Recalque estimado para um ponto qualquer;

$p_i$  = peso da interação entre o ponto e os vértices

Onde  $p_i(x, x_i, y, y_i)$  é dado pela Equação 3.

$$p_i(x, x_i, y, y_i) = 1 / d(x, x_i, y, y_i) \quad \text{Eq. 03}$$

$d$  = distância entre o ponto e o vértice

Caso  $d(x, x_i, y, y_i) = 0$ , então o recalque estimado para qualquer ponto pode ser definido por meio da Equação 4

$$R^v_{ij}(x_i, y_j) = R^r_i \quad \text{Eq. 04}$$

Concluído este procedimento a superfície terá adquirido um formato que mais se assemelha à realidade, como pode ser verificado na Figura 13.

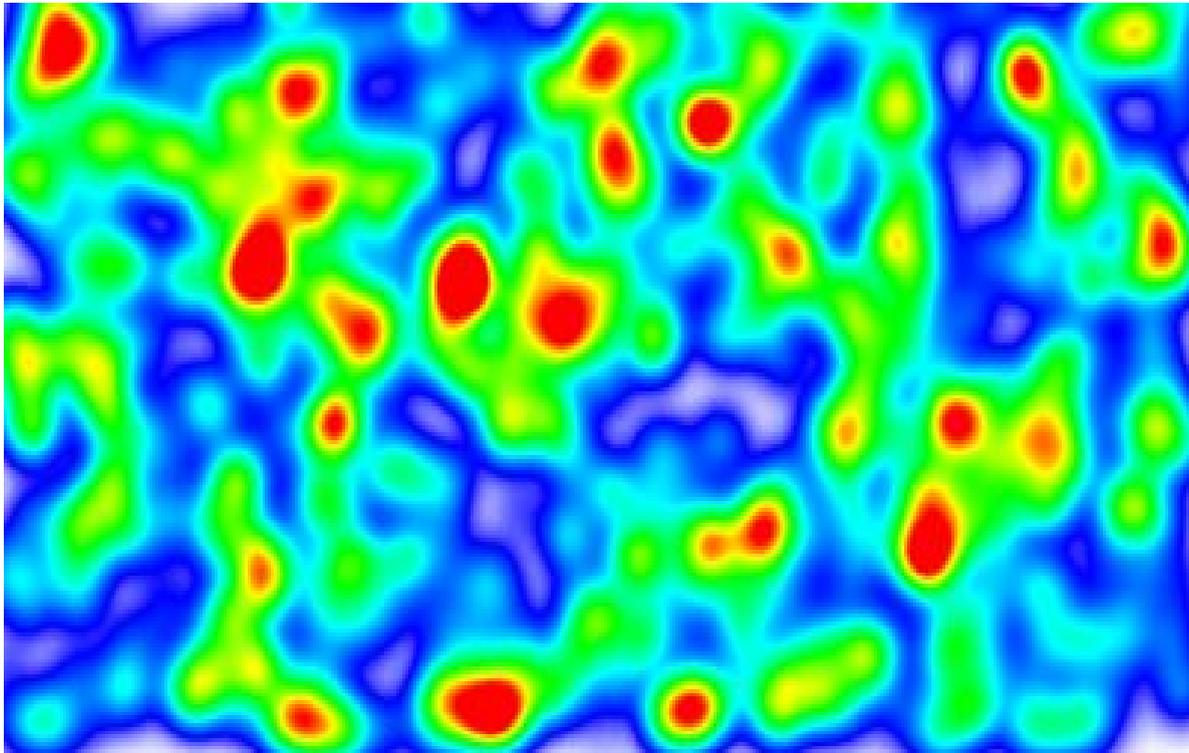
**Figura 13.** - Representação tridimensional de um terreno com curvas de nível



**Fonte** - <https://mundogeo.com/blog/2010/08/05/mdt/>

Seja  $R_{n+1}$  uma matriz de ordem qualquer onde  $R_{ij}$  representa o recalque de um determinado ponto de coordenada  $P_{n+1} = (x, y, R_{ij})$ , assumido que  $x$  e  $y$  sejam constante ao longo de todas as medições e  $R_{ij}$  variável, ao subtrair  $P_{n+1} - P_n$  o resultado será  $P_{n+1,n} = (0, 0, \Delta R_{ij})$ , onde  $\Delta R_{ij} \geq 0$ . Para cada valor  $\Delta R_{ij}$  é então aplicado um valor entre 0 e 255, sendo 0 para os pontos onde a variação foi mais expressivas e, conseqüentemente, 255 para os locais onde foram nulas, Figura 14.

**Figura 14.** - Mapa de calor



**Fonte** - <https://mapserver.org/fr/output/kerneldensity.html>

Logo,  $R_{n+1} - R_n$  representa a deformação do maciço entre as medições de recalque. Usando este procedimento em todas as medições será possível observar o fenômeno de redistribuição dos esforços a partir do momento em que for cessado o incrementos nos carregamentos até o momento que ocorre a estabilização.

Conforme proposto por Gusmão (1990), os recalques tendem a variar de modo a se aproximar da média, quando esta condição for estabelecida espera-se que a variação da superfície ocorra de forma uniforme, logo  $|\Delta R_{ij} - \Delta R_{i+n,j+m}| \approx 0$ , sendo assim a região irá apresentar uma coloração relativamente uniforme. torrentemente com este método será feita a análise através das curvas de dispersão a fim de comparar os métodos: observar a série históricas das medições procurando observar se existe uma tendência de aumento na frequência dos valores médios.

As curvas de dispersão são produzidas utilizando as seguintes funções (Equação 4 e 5)

$$f(R_{ij}^v(x,y)) = 1 / (\sqrt{2\pi}\sigma) \exp ( g( R_{ij}^v(x,y) ) ) \quad \text{Eq. 04}$$

$$g( R_{ij}^v(x,y) ) = - ( ( R_{ij}^v(x,y) - \mu )^2 ) / 2\sigma \quad \text{Eq. 05}$$

Onde

$R_{ij}^v(x,y)$  = Valor qualquer de recalque na;

$\mu$  = Média do recalque;

$\sigma$  = Desvio padrão;

### 4.3. Desempenho das fundações

Após concluir o *script* usado para processar os dados foi feita a análise dos resultados. Primeiramente foi gerada a série histórica das curvas de dispersão dos dados coletado, Gusmão (1990) recomenda o uso dos coeficientes de variação para validação, porém como não foi achado valores para servir de parâmetro na literatura as validações necessárias serão feitas através das superfícies de deformação, onde foi analisado o comportamento dos pilares que apresentaram recalque diferencial.

Esta análise visa determinar o comportamento da interação solo estrutura e demonstrar visualmente a redistribuição dos carregamentos. Para esta etapa foram usados somente os dados de monitoramento coletados após a conclusão da etapa de construção da estrutura, a fim de diminuir a contribuição humana na redistribuição dos carregamentos.

Por fim, foram verificados os indicadores de desempenho referentes ao último monitoramento, a fim de atestar a integridade da estrutura.

## 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

### 5.1. Dados de Monitoramento

A Tabela 1 e 2 apresentam os dados coletados pelo monitoramento nas torres A e C entre dezembro de 2015 e maio de 2017.

**Tabela 1 - Dados de recalque dos monitoramentos realizados na torre A**

Posição	Dados de Monitoramento							
	Med 1°	Med 2°	Med 3°	Med 4°	Med 5°	Med 6°	Med 7°	Med 8°
	12/2015	11/2016	02/2016	03/2016	04/2016	05/2016	06/2016	05/2017
P101	0.38	0.42	0.44	0.46	0.66	0.81	0.64	0.39
P102	0.88	1.17	1.31	1.10	1.38	1.55	1.47	1.32
P103	0.95	1.21	1.10	1.13	1.97	2.00	1.91	1.59
P104	0.07	0.10	0.15	0.32	0.37	0.50	0.59	
P105	0.34	0.64	0.59	0.62	0.81	0.91	0.80	0.00
P106	1.13	1.25	0.66	1.07	1.08	1.22	1.22	0.21
P107	0.13	0.27	0.36	0.47	0.62	0.31	0.18	0.00
P108	0.78	0.58	0.83	0.84	0.87	1.55	1.80	
P109	0.00	0.00	0.00	0.06	0.01	0.59	0.47	0.00
P110	0.94	1.06			1.19	1.19	1.20	
P111	0.10	0.11	0.34	0.38	0.43	0.38	0.33	0.00
P112	0.42	0.17	0.71	0.78	0.91	1.03	1.03	
P113	0.12	0.03	0.18	0.40	0.11	0.14	0.00	
P114	0.01	0.00	1.41	1.64	1.97	1.97	1.97	
P115	0.65	0.52	0.69	0.66	0.66	1.03	1.04	0.27
P116	0.34	0.36	0.24	0.27	0.44	0.49	0.00	0.00
P117	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P118	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	0.32	0.00	0.55
P119	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P120	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P121	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P122	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P123	0.00	0.01	0.00	0.15	0.18	0.25	0.00	0.00
P124	0.14	0.13	0.12	0.02	0.09	0.38	0.40	0.32
P125	0.05	0.00	0.35	0.80	0.50	0.63	0.70	0.43
P126	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

**Tabela 2 - Dados de recalque dos monitoramentos realizados na torre C**

Posição	Dados de Monitoramento							
	Med 1°	Med 2°	Med 3°	Med 4°	Med 5°	Med 6°	Med 7°	Med 8°
	15/12/15	12/01/16	15/02/16	15/03/16	14/04/16	12/05/16	15/06/16	25/05/17
<b>P301</b>		0.00	0.03	0.00	0.22	0.32	1.25	0.72
<b>P302</b>	0.03	0.29	0.00	0.22	0.30	0.00		
<b>P303</b>	0.05	0.00	0.00	0.41	0.45	0.51	0.00	0.14
<b>P304</b>	0.40	0.52	0.94	1.09	1.47	1.51	1.65	2.31
<b>P305</b>	1.16	1.65	2.26	1.60	1.66	1.16	0.85	1.20
<b>P306</b>	0.35	0.92	0.00	0.00	0.04	0.04	1.04	0.97
<b>P307</b>	0.58	0.48	0.86	1.12	1.38	1.63	2.26	2.26
<b>P308</b>	0.00	0.26	0.69	1.10	1.44	2.31	3.82	3.48
<b>P309</b>	0.27	0.67	1.20	1.65	2.05	2.53	2.88	
<b>P310</b>		0.84	1.07	2.01	2.30			
<b>P311</b>	0.05	0.07	0.39	0.50	0.72	0.90	1.04	1.71
<b>P312</b>	0.54	1.11	1.13	1.29	2.43	2.11	2.41	1.92
<b>P313</b>	0.34	0.60	0.83	0.97	1.07	1.51	0.96	2.21
<b>P314</b>	0.19	0.93	0.93	1.41	1.93			3.30
<b>P317</b>	0.29	0.34	0.88	0.92	1.10	1.44	0.96	1.77
<b>P318</b>	0.00	0.03	0.38	0.59	0.77	1.37	1.70	0.93
<b>P319</b>	0.42	0.47	0.45	0.63	0.74	0.81	0.50	0.95
<b>P320</b>	0.27	0.33	0.67	0.99	1.28	1.45	0.48	1.26
<b>P321</b>	0.88	0.88	0.81	1.18	1.29	1.54	1.67	1.78
<b>P322</b>	0.53	0.63	0.53	0.51	0.54	0.67	0.84	0.93
<b>P323</b>	0.27	0.30	0.11	0.26	0.28	0.28	0.81	0.70
<b>P324</b>	0.16	1.50	0.89	0.87	0.52	0.53	1.13	3.07
<b>P325</b>	0.63	0.64			0.99			
<b>P326</b>	1.65	1.97	2.42	2.36	2.37			
<b>P327</b>	0.47	0.53	1.01	0.81	0.82			3.37
<b>P328</b>	0.30	0.63	0.87	0.00	0.00			1.08
<b>P329</b>	0.04	0.14	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>P330</b>	0.08	0.29	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>P331</b>	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	
<b>P332</b>	0.03	0.55	0.14	0.00	0.00	0.00	0.49	0.54
<b>P333</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>P334</b>	0.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.01
<b>P335</b>	0.43	0.50	0.62	0.54	0.61	0.41	0.62	0.67
<b>P336</b>	0.01	0.00	0.00	0.09	0.02	0.12	0.07	0.06
<b>P337</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.79	0.82
<b>P338</b>	0.02	0.05	0.17	0.21	0.11	0.16	0.00	0.00
<b>P339</b>	0.05	0.10	0.16	0.17	0.19	0.14	0.60	
<b>P340</b>	0.05	0.13	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00

Através das tabelas é possível ver os recalques de cada uma das torres monitoradas separados pelo pilar e monitoramento, as tabelas apresentam uma maneira eficiente de apresentar a progressão dos dados coletados.

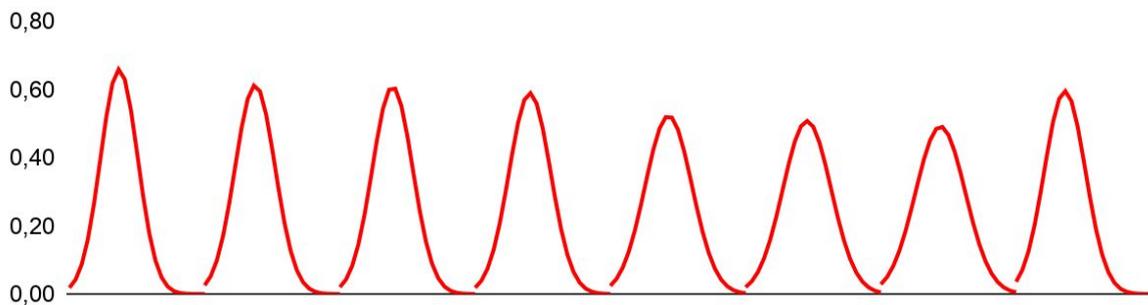
Infere-se a existência de recalque diferencial em ambos os casos, a exemplo dos pilares P103/113, na torre A e P309/336 na torre C, com diferencial de aproximadamente 2 e 3mm.

As células que não possuem dados indicam que a instrumentação foi danificada durante o período entre as medições, observa-se também que os dados da última medição realizada na Torre A estão incoerentes visto que houve uma variação negativa dos recalques que excede a margem de erro do equipamento utilizado, isto ocorreu devido à aplicação do revestimento interno.

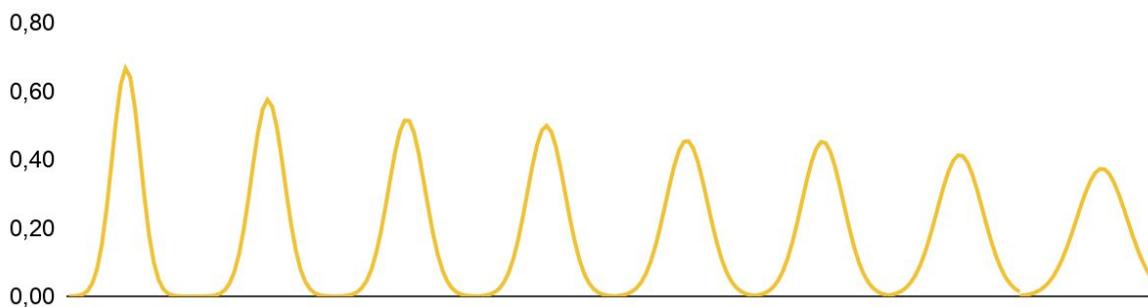
## 5.2. Interação Solo estrutura

As curvas de frequência apresentaram um comportamento decrescente ao longo do período de monitoramento dos recalques absolutos aferidos nas medições, para ambas as torres, Figura 15 e 16.

**Figura 15.** - *Dispersão dos representado a interação solo estrutura da torre A*



**Figura 16.** - *Dispersão dos representado a interação solo estrutura da torre C*

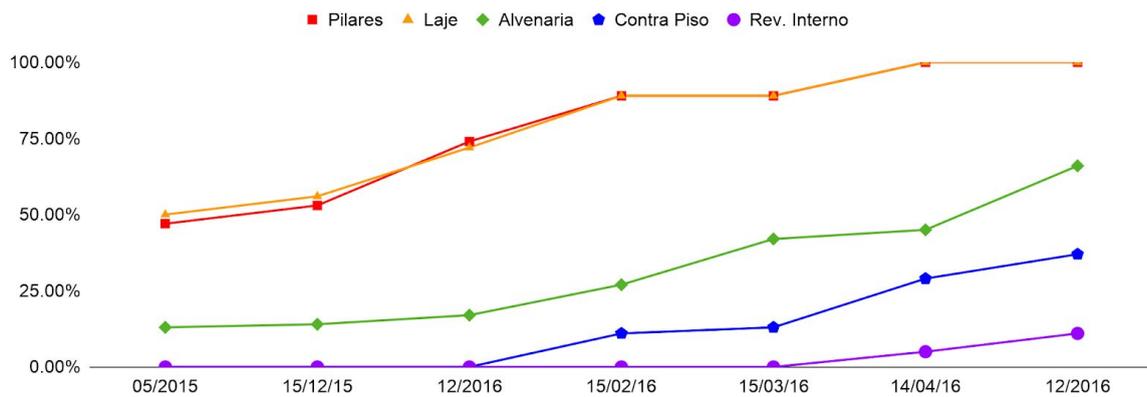


Existem duas causas para o aumento da dispersão desta torre, o primeiro caso é a deformação do maciço provocando pela expulsão de água do solo, visto que o monitoramento foi iniciado já no período de construção, conforme mostra a Figura 17 e 18. Em segundo lugar é a possibilidade dos dados aferidos estarem incompatíveis com a realidade.

**Figura 17 - Porcentagem de conclusão da torre A**



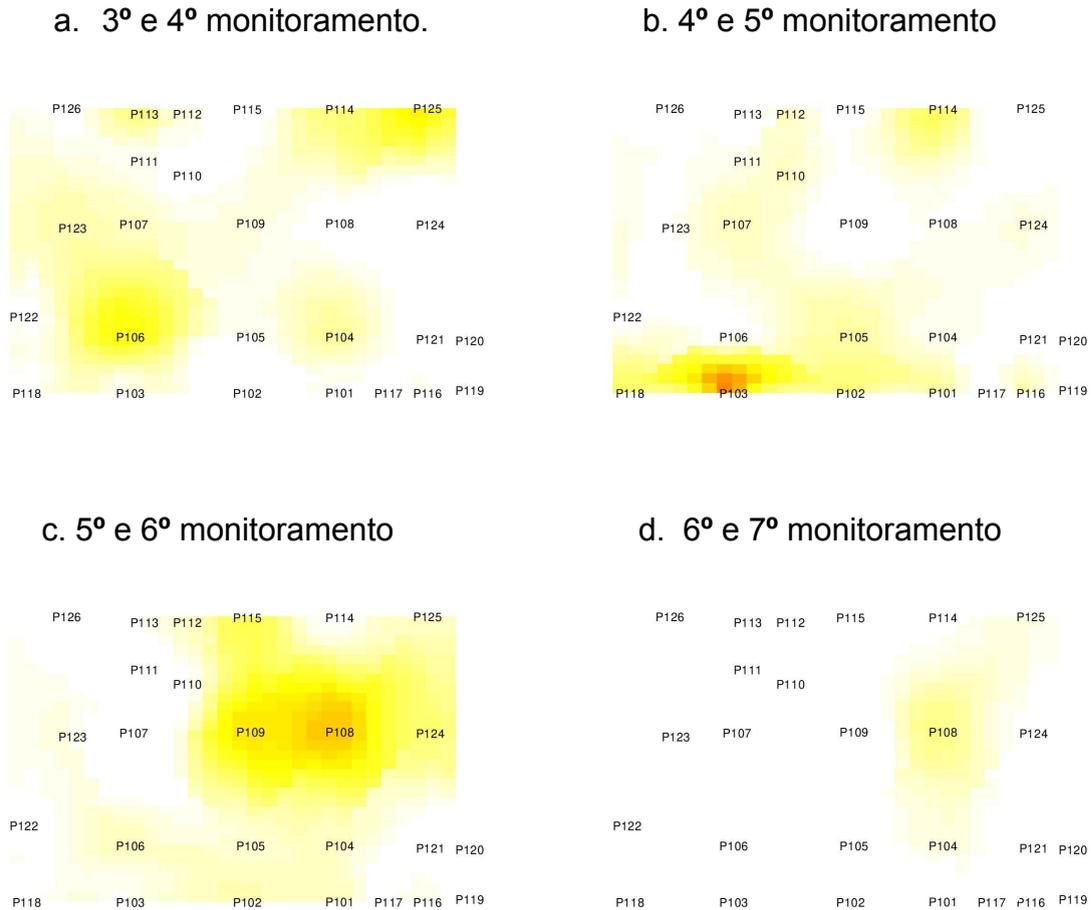
**Figura 18 - Porcentagem de conclusão da torre B**



Os quantitativos mostram que uma parcela significativa das torre já estava construída quando os monitoramentos foram iniciados. Logo, existe a possibilidade de que a amostra esteja prejudicada, para esta análise, por falta de condições de contorno iniciais, fazendo com que a aplicação desta metodologia de dispersão produzisse resultados inconclusivos no caso da torre A.

Os mapas de calor da torre A, Figura 19, mostram os focos de variações entre cada uma dos monitoramentos, a partir da terceira medição.

**Figura 19. - Mapas de calor da torre A**

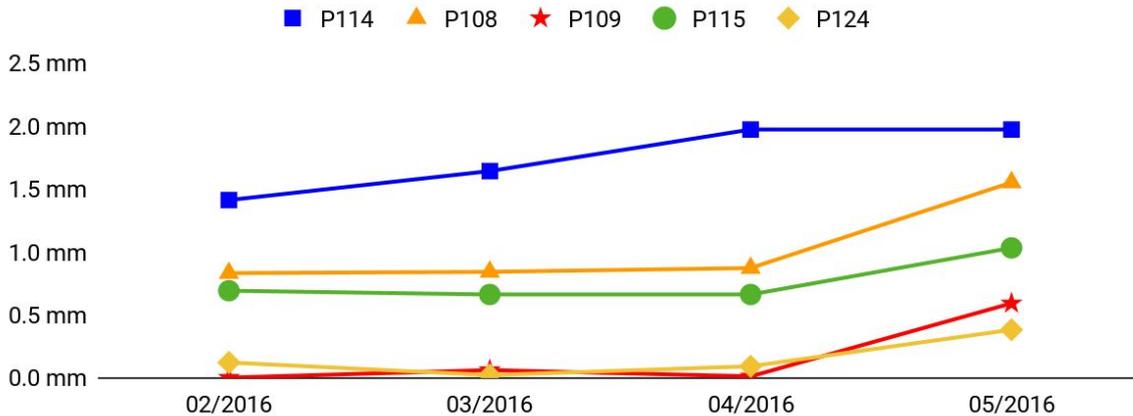


Observa-se uma intensa atividade ao redor dos pilares P114 e P103. Os resultados mostram que existe uma alternância entre os pilares, em cada uma destas regiões, nos quais foram registrados as maiores variações.

Durante a etapa de carregamento da obra o pilar P114 acumulou recalques até atingir a marca de 1.97mm, paralelamente P108, P109, P115 e P124 mantiveram-se relativamente inalterado. Após atingir esse valor não foram mais

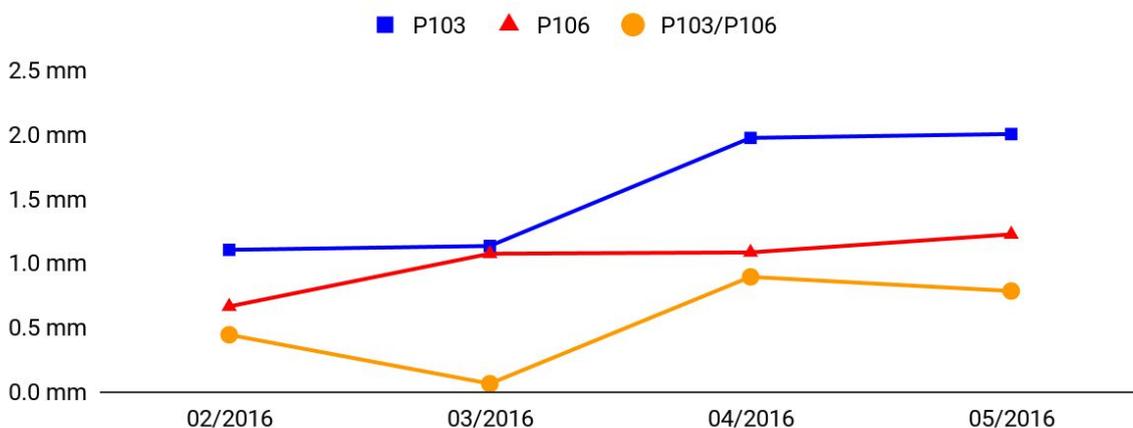
registrados aumentos nos recalques de P114, no entanto houve uma variação repentina no grupo de pilares adjacente. Figura 20.

**Figura 20 - Recalque no grupo de Pilares P114, 108, 109, 115 e 124**



O comportamento dos elementos de fundações foi produto do recalque diferencial entre os verificados através dos pilares destacados na Figura 20. A estabilidade pode ser explicada pelo aumento na rigidez da estaca devido à capacidade reduzida de movimentação, ocasionada pelo aumento da poro pressão. que fez com que qualquer parcela do carregamento que não foi devidamente dissipada no solo fosse redistribuída para outros pilares, explicando assim as alterações em P108, P109, P115 e P124. O mesmo padrão de comportamento pode ser visto em P103 e P106, conforme mostra a Figura 21.

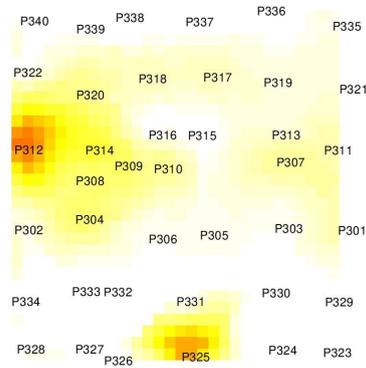
**Figura 21 - P103 e P106**



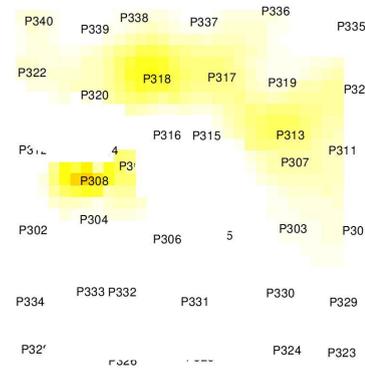
Os mapas de calor, Figura 22, corroboram com a hipótese de que a interação solo estrutura pode ser observada usando os recalques relativos como ponto de referência.

**Figura 22. - Mapas de calor da torre C**

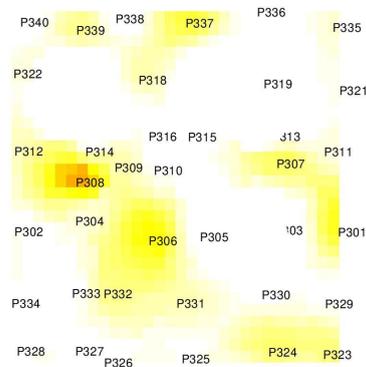
b. 4º e 5 monitoramento.



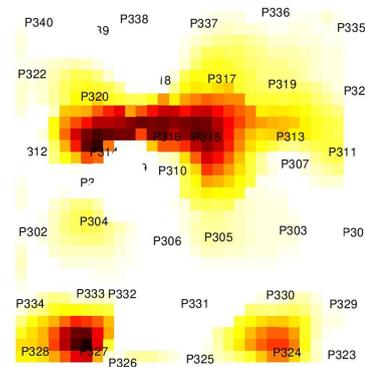
b. 5º e 6º monitoramento



c. 6º e 7º monitoramento



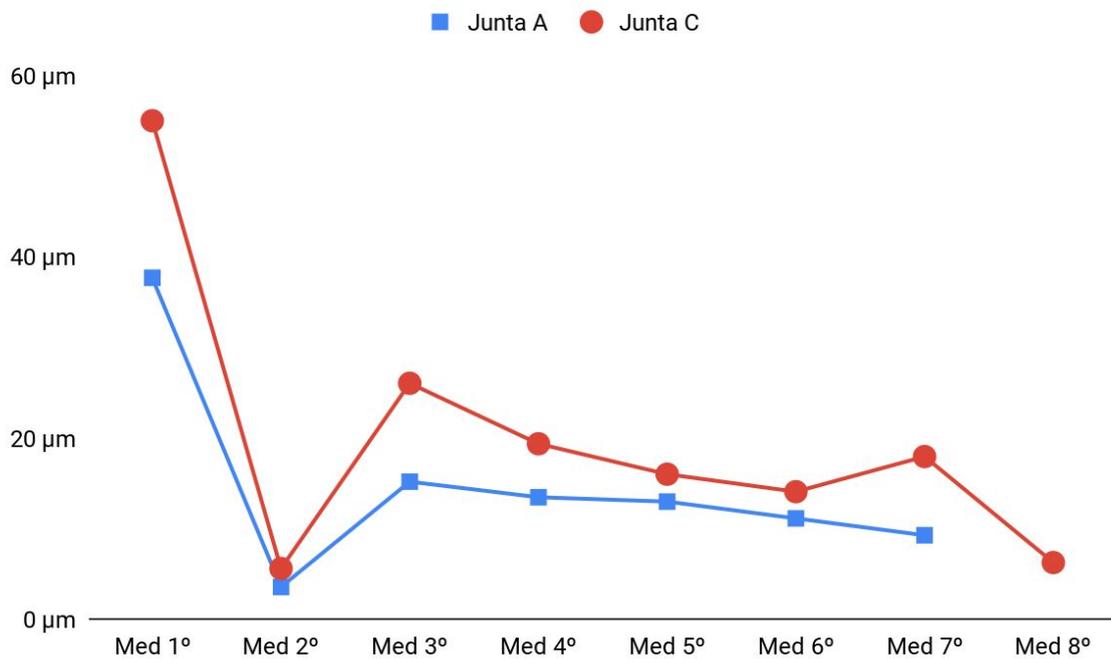
d. 7º e 8º monitoramento



Como demonstrado anteriormente, os elementos de fundação com recalque absoluto de maior intensidade agem como ponto de propagação, apresentando a tendência de seguir na direção dos pilares com deformação inferior, usando a conexão entre estes como meio de locomoção. Novamente é possível observar o padrão alternado em vários pilares indicando o processo de regularização desta superfície.

As fundações de ambas as torres apresentaram desempenho satisfatórios. Ao longo dos monitoramentos não foi verificado em nenhuma das torres uma velocidade que excedesse o limite de segurança de 80  $\mu\text{m}$  por dia para obras ainda em fase de construção, Figura 23.

**Figura 23** - Velocidade de recalque da torres A e C



Os distorcionais máximos verificados em cada uma das torres foram: de 1/2981, entre os pilares P112/113 e, na torre C 1/1622 entre os pilares P327/333.

## 6. CONCLUSÃO

A metodologia tradicional mostrou uma dependência de um acompanhamento nos estágios iniciais de monitoramento. Logo, se optado por este método é preciso um estudo geotécnico acerca da deformabilidade do solo para estimativa dos recalques sofridos entre o início da obra e o início do monitoramento. Usando como base os recalques relativos foi possível observar a interação solo estrutura, pois as variações observadas são as mesmas sabendo-se ou não o estado de deformação inicial, com isto foi possível determinar a estabilidade de uma das torres devido a redução do diâmetro das ilhas de calor e taxas de variações.

A partir das taxas de variações nos mapas infere-se que a torre A encontra-se no período de transição do adensamento primário para o secundário, pois conforme observado existe uma tendência de uniformização das cotas dos pilares, reduzindo a incidência de recalque diferencial, com graduação decrescente. O mesmo não pode ser dito da torre C, pois apesar do desenvolvimento favorável ainda há uma parcela significativa do carregado que ainda não foi aplicado, logo é preciso continuar o monitoramento para saber como a será resposta do solo perante às tensões aplicada.

A visualização espacial dos elementos apresentou vantagens em relação ao método tradicional no que diz respeito à identificação de padrões de comportamento de grupos de pilares levando em conta as ligações rígidas entre si. No entanto, esta ligação não existem de maneira formal no método utilizado, no que diz respeito ao código sobre as vigas, bem como os pilares e elementos de fundação, são uma mera abstração dos dados utilizados para a produção dos mapas de calor. Sendo assim é válido assumir que existe espaço para melhorias imediatas considerando estes elementos como objetos<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> entende-se, em linguagem de programação, que "objeto" é um conjunto de métodos que dão representação virtual a algo existente no mundo real.

O método ainda possui uma dificuldade de implementação superior à produção de curvas de dispersão. Além de precisar de um quantidade superior de comandos, processamento, possuir uma base matemática superior é preciso que os indexadores sejam os mesmo em todos os mapas gerados a fim de comparar os valores que estão na mesma posição espacial. Sendo assim, o aumento da resolução das imagens entre as geradas significam uma degeneração das relações entre dois pontos que ocupam o mesmo lugar no espaço, separados pelo tempo. Um sugestão futura para a adequação destes problema é por meio de curvas de preenchimento de superfícies, como por exemplo curva de Hilbert e distribuição do código através de uma plataforma.

A distribuição de uma plataforma apresenta-se como uma solução de mercado interessante, pois além de auxiliar as análises torna-se possível uma base nacional de recalques, que pode ser usada em colaboração com desenvolvimento de projetos estruturais, elevando a eficácia deste sistema em relação ao fenômeno abordado.

## 7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2006). **Estaca – Prova de carga estática – Método de ensaio: NBR-12131**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ,

ABNT (2010). **Projeto e execução de fundações: NBR- 6122**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ

ALONSO, U.R., (1991)., **Previsão e controle de fundações**. 1 ed. Editora Edgar Blucher Ltda, São Paulo. p. 14.

AOKI, N., ALONSO, U.R., (1991) **Previsão e comprovação a carga admissível em estacas**. Workshop ministrado no Instituto de Engenharia de São Paulo. Revista Engenharia, São Paulo, Instituto de engenharia.

BARROS, R. A. (2005). **Avaliação do comportamento de fundações em estaca hélice através de medidas de recalque**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 118p.

GUSMÃO, A. D., (1990). **Estudo da Interação Solo-Estrutura e sua Influência em Recalques de Edificações**. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE.

HOLANDA JR., O. G., (2002). **Influência de recalques em edifícios de alvenaria estrutural**. São Carlos. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MELO, M. C., (2003). **Uma análise de recalques associada a biodegradação no aterro de resíduos sólidos da Muribeca**. Recife.

MILITITSKY, J.; CONSOLI, N. C.; SCHNAID, F (2005). **Patologia das fundações**. Oficina de textos, SP.

REBELLO, Y. C. P. (2011)., **Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento**. 3. ed. São Paulo: Zigurate.

RUSSO, L. N., (2005). **Interação de deformação de recalque na fase de montagem de estrutura de controle com fundação em estaca cravada**.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. (1997). **Fundações Critérios de Projeto, Investigação do Subsolo, Fundações Superficiais e Fundações Profundas**. Vol. Completo, São Paulo, Oficina de Textos.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. (2011). **Fundações, critérios de projeto – investigação do subsolo** – fundações superficiais. 2a ed., vol.1, Oficina de Textos.

## ANEXOS

Link para o github hospedando o código

